

双放电 CO₂ 激光器非稳定腔输出及脉冲宽度影响因素的实验研究

傅裕寿 王春奎

(中国科学院力学研究所)

Experimental studies on the output power and pulse width variations of a double-discharge CO₂ laser with unstable cavity

Fu Yushou Wang Chunhui

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

The experimental results on the quality of output beam and pulse width are summarized. Unstable resonator is effective in improving the beam quality, the pulse widths can be adjusted in 1–100 microsecond range by changing the gas pressures and proportions of CO₂ and N₂.

一、问题的提出

双放电 CO₂ 激光器在研究与物质相互作用及用于工业加工生产中是一种很灵便和有其独特优点的器件^[1]。在具体应用中一般对输出光束的质量和脉冲宽度都有一定的要求,即要求单模输出和脉冲宽度在大的范围内可调。

在对材料打孔中发现,一个稳定的单模输出打出的孔在显微镜下观察是一个很圆的小孔,反之,多而不规则的模式打出的孔则呈畸形,甚至中间出现小岛,达不到加工的要求。

实验表明,在用稳定腔输出时,要求单模

与双放电大体积激励、大面积出光是一个矛盾。因为,双放电的增益很高,很容易引起多模振荡。应用平行平面腔是解决输出光束质量的一种途径。但具体应用中发现,这种腔,对镜片加工的平行度及准直要求都很严格,给实际应用带来困难。

非稳定腔为解决上述难题提供了一个很好的途径。

在研究激光与材料相互作用中,一个经常涉及的问题是激光对材料的破坏。在同样的光学聚焦系统中,不同的脉宽可以形成不同的功率密度,因而引起材料的破坏的物理过程也是极不相同的。

就力学所自制的双放电 CO₂ 激光器而

收稿日期: 1979 年 3 月 5 日。

论,在大气压下脉宽为 10^{-6} 秒。在加工所要求的光点尺寸很小的情况下(例如直径在1毫米以下),其聚焦点处的功率密度很容易达到 $10^8 \sim 10^9$ 瓦/厘米²。在这样高功率密度的作用下,在光路通过的气体中,出现等离子体,对激光产生严重的吸收,致使后来的激光部分地或全部不能达到材料表面,形成严重屏蔽效应,因而激光对材料失去直接破坏的能力,有时甚至没有到达材料表面就首先击穿空气,将能量消耗掉,无法进行加工。所以在将器件应用于加工时,必须将脉宽拉宽,这样对影响脉宽变化的因素及脉宽可能变化的范围进行实验研究就成为十分必要的了。

二、非稳定腔的设计及实验装置

非稳定腔具有较大的可控模体积,可控的衍射耦合输出,可设计成平行的输出光束,并有理想的聚焦图样等优点。

1. 形式选择

为了得到准直平行输出光束,选择非稳定腔共焦结构的正支形式,如图1所示。

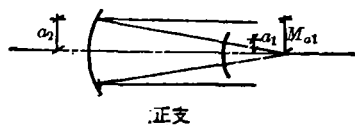


图1 非稳定腔单端正支共焦输出示意图

实验装置是利用力学研究所自制的双放电 CO₂ 器件。图2是实验布置示意图。

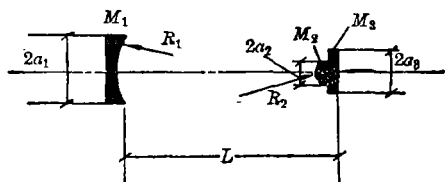


图2 非稳定腔实验布置示意图

M_1 —凹面反射镜; M_2 —凸面反射镜; M_3 —锗窗

镜 M_1 为全反镜,镀金膜,直径 $2a_1=100$ 毫米,曲率半径 $R_1=6000$ 毫米。镜 M_2 是镀

金膜的凸反射镜,直径 $2a_2=35$ 毫米,曲率半径 $R_2=4000$ 毫米。镜 M_2 用胶粘贴在镀增透膜的锗平片上,锗片的外环作为输出窗口。腔体长度 $L=1000$ 毫米,锗片直径 67 毫米,透射率为 98%。输出部分为内径 35 毫米、外径 54 毫米的圆环。

按照上述设计,共焦的焦点在腔外 2000 毫米处,光腔参数 $g_1=+\frac{5}{6}$, $g_2=+\frac{5}{4}$ 。

根据 A. E. Siegman^[2] 证明,如果对称和不对称共振腔满足一定的等效关系式,则不对称单端共振腔来回一周的放大率和功率损耗,完全等效于对称的单程放大率 M 值和功率损耗值 δ 。利用已有的对称腔的结果,对不对称的单端共振腔可以作出设计,其重要的等效关系为:具有参数 $g_1=1-\frac{L}{R_1}$, $g_2=1-\frac{L}{R_2}$, $N_2=\frac{a_2^2}{L\lambda}$, $N_1 \rightarrow \infty$ 的不对称单端共振腔来回一周的损耗和放大率 M 与具有下列参数: $g=1-\frac{L}{R}=|2g_1g_2-1|$,

$$N=\frac{a^2}{L\lambda}=|N_2/2g_1|$$

的对称共振腔的单程损耗和单程放大率完全等效。

本实验的凸反射镜为 $a_2=\frac{35}{2}$,其菲涅耳数 $N_2=\frac{a_2^2}{L\lambda}=29$ 。 $N_1=240$ (相对来说可近似认为趋于无穷大)。根据 $g_1=\frac{5}{6}$, $g_2=\frac{5}{4}$,

$$\text{得 } g=|2g_1g_2-1|=1\frac{1}{12},$$

$$\text{则 } M=g+\sqrt{g^2-1}=1.5,$$

输出耦合率 $\delta \approx \left(\frac{M^2-1}{M^2}\right)^2=0.315$ 。这要求非稳定腔输出窗口外径应为 $2a_3 > 2Ma_2=53$ 毫米,我们采用输出直径 $2a_3=54$ 毫米。

2. 非稳定腔的输出实验结果

非稳定腔输出在近场是一很规则的圆环,在焦平面上(即远场分布)观察到很圆的

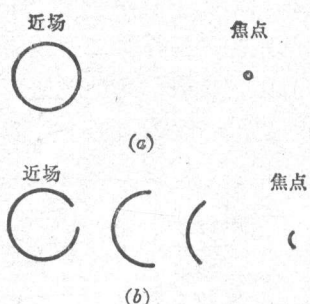


图3 非稳定腔输出的近场及远场图形
(a) 对准光束; (b) 失稳情况

斑点, 如果对光失准, 则观察到明显的环蚀, 其焦平面上也不再是一圆斑, 如图3所示。实验同时证明, 非稳定腔的输出光束比平面腔的输出光束要稳定得多, 而比平凹稳定腔的输出光束质量要好得多, 具体使用效果见表1。

表1 非稳定腔打孔

材料名称	钢锯条	不锈钢	橡皮	有机玻璃
材料厚度 (毫米)	0.65	1.0	2.0	4.0
穿透材料所需要的脉冲次数	17	37	4	26

打孔时用的锗透镜焦距 $f=90$ 毫米, 腔内气压为 60 托, 腔内气体比例为

$$\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 1 : 6,$$

没有使用氦气, 输出能量为 1 焦耳。

使用同样气比、同样气压在同一器件上用平凹稳定腔输出, 用同样的焦距打孔则效果很差。由于稳定腔输出光束质量很差, 模式结构极不规则, 打孔很困难, 在大致相同的能量下对金属材料根本不能穿孔, 只是一不规则的坑痕。例如用稳定腔输出穿透 2.0 毫米的橡皮所需次数为 100, 而对 0.65 毫米的钢锯条, 1.0 毫米的不锈钢, 4.0 毫米的有机玻璃等材料, 分别聚焦辐照 300 次脉冲都不能穿透材料, 只是留下不规则的坑痕。对汽化阈值低的材料, 如有机玻璃则坑痕面积大, 见照片(1)。同样的条件对锯条和不锈钢

辐照的结果与对有机玻璃辐照的形状也不同, 见照片(2)、(3)。经过仔细地调腔使其模式有所改善, 对印刷线路板材料打孔, 上百次不能穿孔, 其斑痕面积大而不规则, 如照



照片1 有机玻璃, 稳定腔输出照射 300 次
(放大 20 倍)



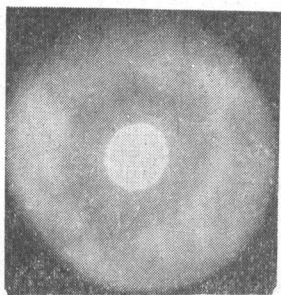
照片2 锯条, 稳定腔输出照射 300 次
(放大 20 倍)



照片3 不锈钢, 稳定腔输出照射 300 次
(放大 20 倍)



照片4 印刷线路板材料(放大 20 倍)



照片5 非稳定腔输出典型穿透孔照片
(放大20倍)

片(4)。

用非稳定腔输出光束穿透孔的典型情况见照片(5),放大20倍以后,仍然显示出规则而且较圆的小孔。

在用非稳定腔打孔时发现对较厚的材料出现一定的锥度,对此问题的解决将另行讨论。

三、控制脉冲宽度实验

在双放电 CO_2 激光器件中,影响脉冲宽度的主要因素是气比和气压,这是因为激光上能级的集居数一部分是由于 CO_2 分子被电子直接碰撞激励发生,另一部分依赖于处在上能级的 N_2 分子与 CO_2 分子的碰撞发生共振转移所致,这种碰撞共振转移导致脉冲宽度加宽。

激光器脉宽随气压增高而减少,这是 CO_2 分子碰撞随气压增加而增加的一个反映,因为激光泵浦机理主要是碰撞,在较高的气压下,所有的过程以更快的时间速率而发生。反之则使脉宽加宽。

1. 实验装置

本文叙述了各种气压和气比下测得的脉冲波形,波形是用自己研制的P型锗光子牵引探测器测得的^[3]。

由于输出光是内径为35毫米、外径为54毫米的圆环,而光探测器的截面只有 5×5 毫米²,接受输出光困难,信号也弱。用单透镜聚焦将信号输送到探测器上很易将光探测

器元件破坏。本实验应用了由二个共焦透镜组成的光学系统,通过第二透镜将输出的光束缩小,且强度比较均匀地输送到探测器上去,其测定激光输出波形的示意图见图4。

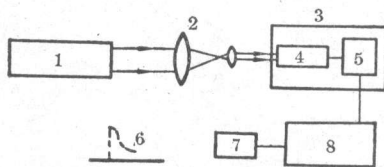


图4 测定脉宽实验方框示意图

1— CO_2 脉冲激光器; 2—锗透镜组; 3—屏蔽盒; 4—P型锗; 5—放大器; 6—波形; 7—照象; 8—示波器

在气压分别为60托、90托、150托、200托的压力下做了各种不同气比(气比 $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{N}_2)$ 从1到 $\frac{1}{20}$ 的范围)脉冲宽度变化的实验。

2. 实验结果

① 在一定的气压下,脉宽与混合气体比例的关系如图5所示,从图中的曲线中可以看出下列规律性。

a) $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{N}_2)$ 的比例小于约 $\frac{1}{3}$ 时,脉冲宽度急剧增加,而大约 $\frac{1}{3}$ 时增加趋势平缓。可以认为,在大约比例为 $\frac{1}{3}$ 时增加速

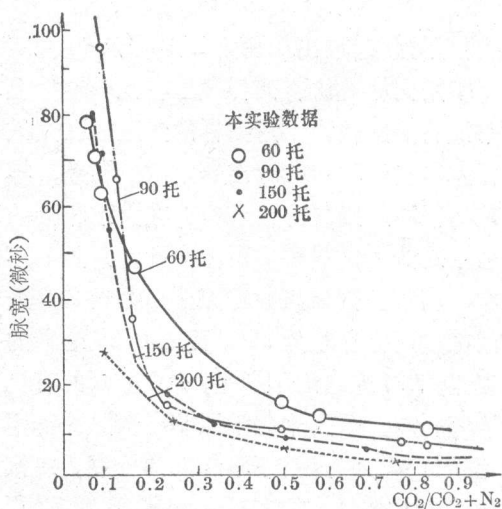


图5 不同气压下混合比与脉冲宽度的关系

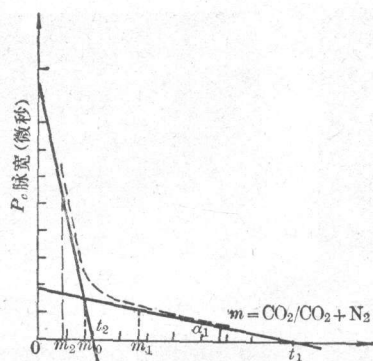


图6 (1)式图解示意

$$m_0 = \frac{1}{3}; Pe_1 = K(t_1 - m_1) \tan \alpha_1;$$

$$Pe_2 = K(t_2 - m_2) \tan \alpha_2$$

率为一分界点, 我们可以近似地整理成下列公式, 定性代表其规律, 作为分析时的参考。其示意图如图6。

$$Pe_1 = K(t_1 - m_1) \tan \alpha_1 \left(m \leq \frac{1}{3} \right) \quad (1)$$

$$Pe_2 = K(t_2 - m_2) \tan \alpha_2 \left(m \geq \frac{1}{3} \right)$$

式中 Pe 代表全脉宽, t_1 、 t_2 分别代表在速率分界点处二斜率在横坐标上的截距, m_1 、 m_2 代表 $CO_2/CO_2 + N_2$ 的比例数, $\tan \alpha_1$ 、 $\tan \alpha_2$ 代表分界点前后的斜率, K 为量纲常数。本实验测得的最大脉宽可达 100 微秒。在大气

压的介质中测得的为 1 微秒。

b) 在 $CO_2/(CO_2 + N_2)$ 比例大于 $\frac{1}{3}$ 时, 在所实验范围 (90 托、150 托、200 托) 内, 脉宽无多大变化。所以加宽脉宽的参数可多考虑在比例小于 $\frac{1}{3}$ 内变化。气比与脉宽的关系见照片 6~13。

(2) 在一定的成分比例下, 脉宽随气压的变化示于图 7。从图中明显地看到, 脉宽随气压的增加而降低, 但随气压进一步增高, 变化也就越小。

(3) 在不同的气压下, 输出能量随气体组分的变化示如图 8, 输出能量大约在 $CO_2/$

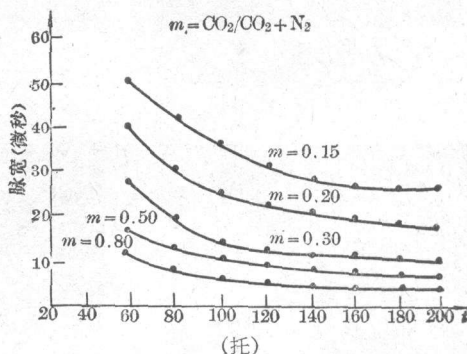
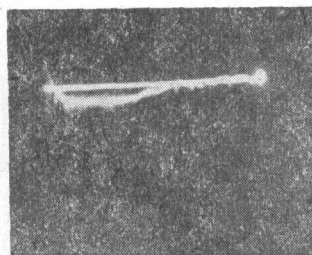
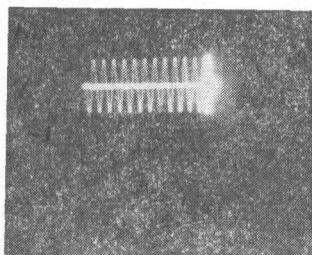


图7 不同气比下气压与脉宽的关系



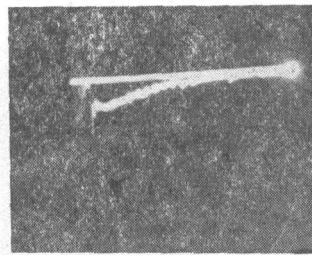
照片 6

$CO_2:N_2=1:12$, 腔体总压力 90 托



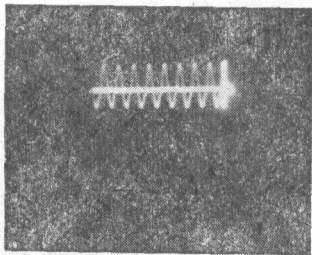
照片 7

照片 6 时标: 每周期 5 微秒



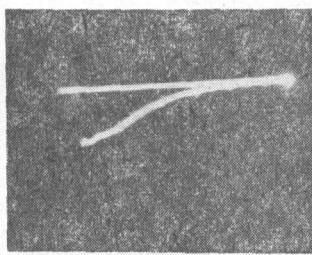
照片 8

$CO_2:N_2=1:9$, 腔体总压力 90 托



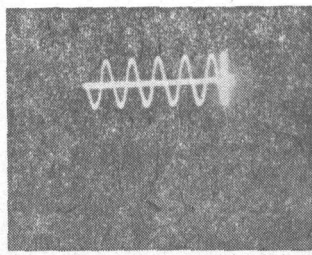
照片 9

照片 8 时标: 每周期 5 微秒



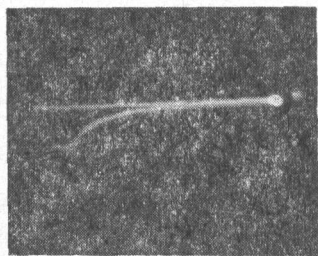
照片 10

$CO_2:N_2=1:4$, 腔体总压力 90 托

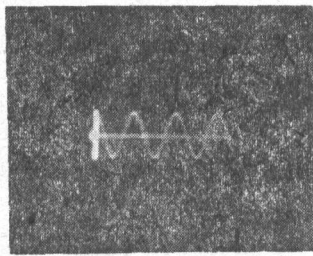


照片 11

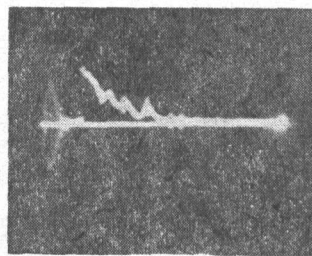
照片 10 时标: 每周期 5 微秒



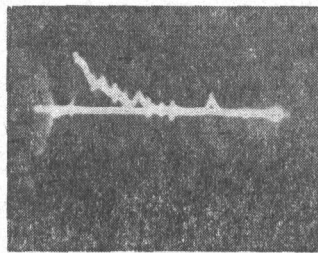
照片 12
CO₂:N₂=1:1,腔体总压力 90 托



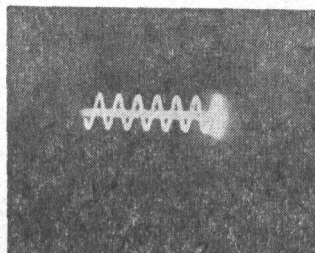
照片 13
照片 12 时标: 每周期 5 微秒



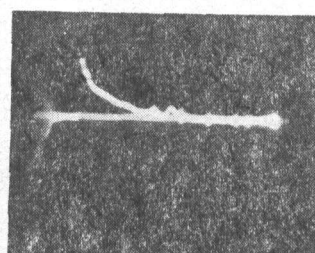
照片 14
CO₂:N₂=1:9,腔体总压力 200 托



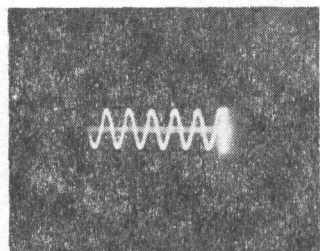
照片 15
CO₂:N₂=1:9,腔体总压力 200 托



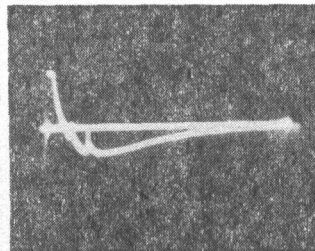
照片 16
照片 14、15 时标: 每周期 5 微秒



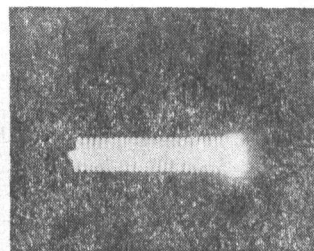
照片 17
CO₂:N₂=1:5,腔体总压力 200 托,
电压小于 30 千伏



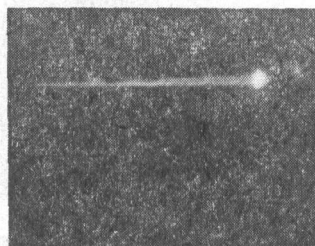
照片 18
照片 17 时标: 每周期 5 微秒



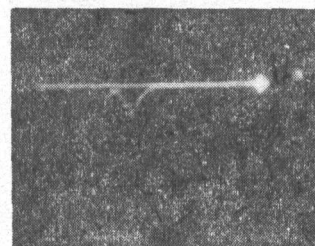
照片 19
CO₂:N₂=1:5,腔体总压力 200 托,
电压大于 30 千伏



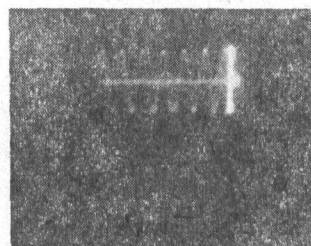
照片 20
照片 19 时标: 每周期 5 微秒



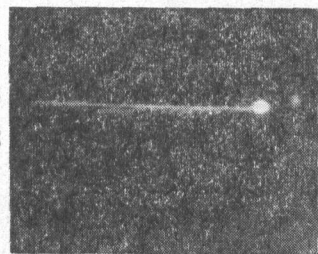
照片 21(纯 CO₂)



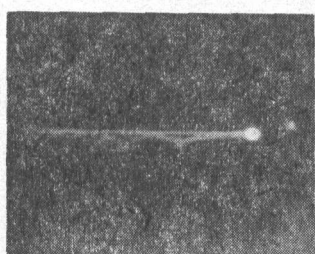
照片 22(纯 CO₂)



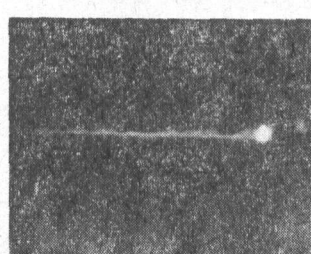
照片 23(纯 CO₂)



照片 24(纯 CO₂)



照片 25(纯 CO₂)



照片 26(纯 CO₂)

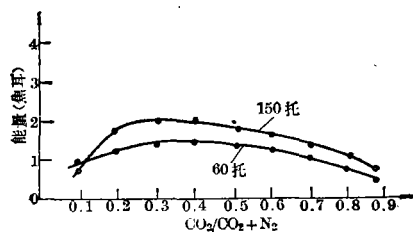


图8 不同气压下混合气比与输出能量的关系

(CO₂+N₂) 的比例为 1/4 时取得最大值。

(4) 在实验时, 观察到电压升高时波形的一些现象, 用照片示出, 供作参考。在此不作分析。

a) 当 $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{N}_2) = \frac{1}{10}$ 时, 高电压时尾部出现第二峰值, 见照片 14~16。

b) 当 $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{N}_2) = \frac{1}{6}$ 时, 低电压

时, 图形在第一象限, 而当高电压时, 波形反常, 如照片 17~20。

c) 纯 CO₂ 在低电压时只有一个尖峰, 电压越高, 尖峰越多, 有时多达序列为 4~5 个尖峰, 见照片 21~26。

参 考 文 献

- [1] 傅裕寿; 《激光》, 1976, 3, No. 6, 33.
- [2] A. E. Siegman; *Laser Focus*, 1971, 7, No. 5, 42~47.
- [3] 王春奎, 傅裕寿, 唐清雅; 《激光》, 1978, 5, No. 4, 17.

高信息速率 LiNbO₃ 光调制器

为满足光纤通讯的需要, 对电光调制器的主要要求是: 宽带、高效率、稳定性好、消光比高、插入损耗小。

用 LiNbO₃ 晶体制作的调制器与 XDP 晶体调制器相比, 具有半波延迟电压低、调制速率高和不潮解等优点, 是一种高效率宽带化的调制器。我们试制的 LiNbO₃ 组合调制器的指标一般可达: 半波延

迟电压: 35 伏 ($\lambda=6328 \text{ \AA}$), 消光比: 14 分贝以上, 透过率: 大于 38%, 电容: 30 微微法。

在光纤传输的 PCM 可视电话通讯联试中获得了较为满意的结果。

(中国科学院福建物质结构研究所
高完成 吴柏昌 黄祥金 黄亦好)